

令和 2 年 5 月 12 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18106

研究課題名（和文）小型端末用60GHz帯3次元指向性制御アンテナの異種サブアレイ指向性合成の研究

研究課題名（英文）Subarray synthesis of 60-GHz-band beam forming array antenna for small terminal applications

研究代表者

吉田 賢史 (Yoshida, Satoshi)

鹿児島大学・理工学域工学系・助教

研究者番号：50751830

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、第5世代の移動通信システムなどの小型携帯端末搭載用60 GHz帯3次元指向性制御アンテナの実現を大きな研究背景とし、異種サブアレイアンテナを複数用いた指向性制御アンテナの設計、試作及び評価を研究目的とする。まず最初に、実装歩留まり問題の解決のため、従来の銅ボール実装の改善を行った。次に、改善した銅ボール実装技術を用いて、同種サブアレイ間内指向性合成の検証として、2x2パッチアレイアンテナの設計、試作、測定を行った。60 GHzにおける利得が10 dBi以上となる領域を評価し、その有効性を示した。最終的に異種サブアレイ指向性合成の検証を行い、その妥当性も確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

移動通信システムは、水道や電気、ガスと同じように、社会的に見て広く普及し、なくてはならないインフラの一つとなった。本研究は、現在サービスが始まりつつある5G以降の次世代移動通信ネットワーク端末に適用可能なアンテナの基礎研究を行ったものであり、本研究で得られた知見を基礎とし、実用化に向けて資金を投入し、ビジネス展開を見据えた開発フェーズへの推進が望まれる。本研究では60 GHz帯において、これまで端末に搭載可能なサイズ、重量の制約下において、実装方式も視野に入れた条件下で、あらゆる方向に指向性を制御できるアンテナの提案を行っており、注目に値すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this document, a novel technology of the copper balls interconnection for millimeter-wave vertical transition in small packages is reported. Using this technology, a 60-GHz-band 2x2 beam-forming array antenna is also reported. Dual-feed patch antenna is used as an element antenna. The proposed antenna structure has two-substrate-stacking structure by the copper balls interconnection technology. The beamforming coverage area with gain exceeds 10 dBi was simulated and measured under the condition of 45 degree phase difference of feeding signal. We have confirmed normal operation of the proposed antenna because all channel signal was observed. Radiation pattern at 60 GHz in all 3-D direction was measured by 5 degree angle resolution. Beamforming area having over 10 dBi gain was evaluated.

研究分野：ミリ波アンテナ工学

キーワード：60GHz帯 アレイアンテナ 3次元実装 伝送線路

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

携帯電話システムに代表されるセルラーシステムは、今やスマートフォンが普及するに至り、大量のデータ通信が無線で行われている。今後もさらなるデータトラフィックの増加が見込まれ、Gbps オーダの超高速無線通信の普及が急務である。そのような超高速通信の普及を目指し、最近では 5G と呼ばれる第 5 世代の移動通信システムについて検討が始まっている。超高速無線通信のために、従来から 60 GHz 帯を用いた WPAN (Wireless Personal Area Network) システムが研究されてきたものの、量産性やコストのみならず、60 GHz 帯の伝搬特性などの技術的課題が山積しており、普及には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、セルラーシステムと WLAN (Wireless Local Area Network) システムが一体化したスマートフォンに、60 GHz 帯の WPAN システムを搭載した次世代携帯端末の実現を見据え、次世代携帯端末搭載用 60 GHz 帯 3 次元指向性制御アンテナの実現を大きな研究目的とする。この目的を達成するため、本研究課題においては、これまでの申請者らの研究成果を基礎とし、従来よりも広い範囲に指向性を制御できる 60 GHz 帯アンテナモジュールの試作と評価を目的とする。

3. 研究の方法

より広い範囲に指向性制御を行うために、素子アンテナ数を増やし、あらゆる方向へ指向性を持たせることを考えた。そのため、多層基板を複数枚積層実装する実装形態を考案し、構造設計を行う。その際の課題は、基板積層実装時に用いる銅ボール実装作業の歩留まり改善である。素子アンテナ数および基板積層枚数が多いほど、実装歩留まりが完動品実現に与える影響は大きい。そのため、まずは銅ボール実装作業の歩留まり改善に取り組んだ。銅ボール搭載部に掘りこみ構造を設けることを考案し、そのへこみに銅ボールを落とし込むことでリフロー時の位置ずれや、基板反り耐性を改善した。次に、同種サブアレイ間内の指向性合成の検証として、パッチアンテナ素子を用いた 2×2 アレイアンテナの設計、試作、測定を行った。直交する 2 偏波の 2 点給電を採用し、それぞれの給電点を用いた場合に、利得が低下する方向の利得向上のため、位相差をつけて 2 点給電を行う手法の有効性を検証した。最終的に、本研究計画の最終段階である異種サブアレイ指向性合成の検証を行った。現時点で学術論文誌採択決定前のため、本報告書内での詳細報告は割愛するが、設計、試作、測定を行い、その有効性を確認済みである。

4. 研究成果

素子アンテナ数および基板積層枚数が多いほど、実装歩留まりが完動品実現に与える影響は大きい。そのため、まずは銅ボール実装作業の歩留まり改善に取り組んだ。銅ボール搭載部に掘りこみ構造を設けることを考案し、そのへこみに銅ボールを落とし込むことでリフロー時の位置ずれや、基板反り耐性を改善した。図 1 は、伝送特性評価のために設計、試作した基板 3 枚積層のミリ波信号の縦方向伝送線路である。提案している銅ボール接続部を 2 か所有する。基板平面方向には、裏面グラウンド付コプレーナ線路で信号を伝送し、基板に対して垂直方向には、銅ボールによる擬似同軸線路モードでの伝送を行っている。掘り込み構造の新設に伴い、ストリップ線路を新たに設けたため、その不連続が反射特性や伝送特性へ与える悪影響がデメリットであったが、図 2 に示す測定の結果、その悪影響も見られるものの、差は小さく、歩留まりおよびサンプル間ばらつき改善とのトレードオフを考慮すると十分に実用的であることを示した。限られたリソースと時間内で設計したため、まだ構造パラメータが十分に最適化されていない。今後、基板材料厚さや銅箔レイアウトなど、電磁界設計を用いる最適化により、伝送特性の改善は可能であると思われる。この成果は、特許出願の後、学術論文誌に投稿し、無事に採録されている。

先述の掘り込み付銅ボール接続技術を用いて、同種サブアレイ間内の指向性合成の検証を行うため、多層基板 2 枚の積層構造を有する 2×2 パッチアレイアンテナの設計、試作、測定を行った。素子アンテナとして、直交給電パッチアンテナを用いて、パッチアレイアンテナの設計を行った。今回は、基礎検討としてアレイ構成がなるべく小さい 2×2 アレイ構成とした。図 3 は設計したビームフォーミングアレイアンテナの全体像である。ビーム形成可能なエリアを評価するため、各素子アンテナの給電信号に対して位相差をつける必要がある。測定において、提案アンテナを受信アンテナとして動作させ、各素子アンテナから出力される信号の振幅と位相を測定し、位相差をつける操作は事後処理で MATLAB を使ってビームエリアを評価した。なお、60 GHz 信号の振幅と位相差をマルチチャネルで同時に測定することは難しいため、各素子アンテナ直下にはミキサチップを実装し、1 MHz の IF 信号に変換してオシロスコープにより測定を行う方法をとった。そのため、図 3 に示す提案アンテナは、2 枚の多層基板を積層実装した構造となっており、上基板がアンテナ基板、下基板がミキサの LO 信号や IF 信号の伝送線路基板となっている。下基板の大きさは 45.0 mm×46.5 mm であり、上基板の大きさは 15.0 mm×16.0 mm である。なお、下基板の IF 信号用コネクタは 16 箇所存在するが、より大規模のアレイにも共用できるようにしたためであり、本報告の 2×2 アレイでは、全 4 素子に 2 点給電されるため、全部で 8 個の IF 信号用コネクタを利用する。LO 信号は 1.85 mm コネクタを利用したエンドランチ同軸コネクタから供給され、各ミキサにはウィルキンソンディバイダにより分配される。IF

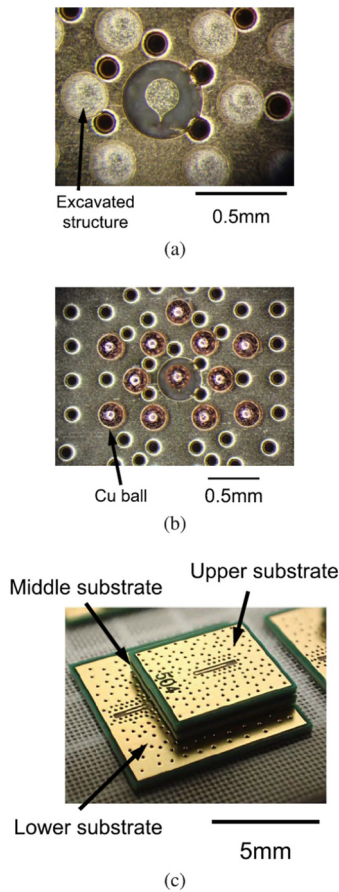


図 1 試作した基板 3 枚積層伝送線路：(a) 銅ボール搭載部の掘りこみ構造，(b) 掘りこみ部に銅ボールを乗せた直後，(c) 完成品

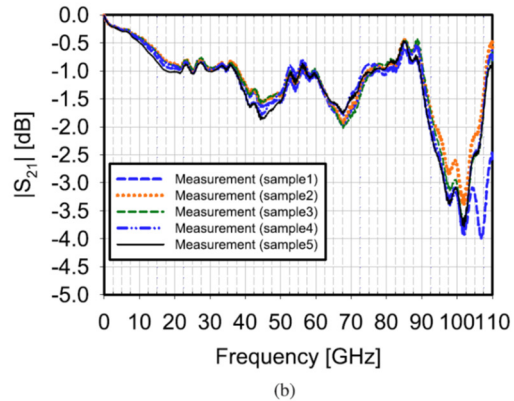
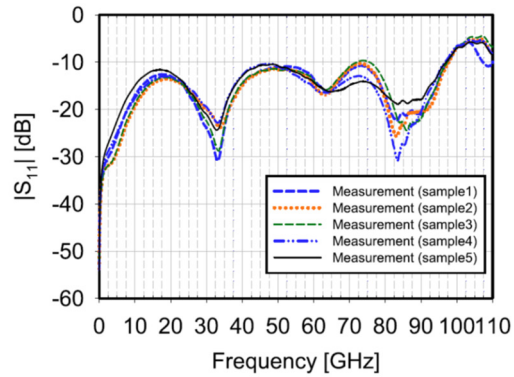


図 2 5 サンプル分の S パラメータ測定結果：(a) 反射特性，(b) 伝送特性

信号のコネクタには，W. FL コネクタを利用している．基板上の伝送線路には，裏面グランドつきコプレーナ線路を利用している．x 方向の素子間隔 dx および y 方向の素子間隔 dy はいずれも 3.0 mm である．なお，基板材料は MEGTRON7 である．アンテナ基板の裏面に GaAs ミキサチップがフリップチップボンディングにより搭載される．各給電点の直下にミキサチップが搭載されるため，ミキサ数は 8 個である．上下基板間の物理的な支持や，信号伝送には図 1 に示す銅ボール接続技術を用いた．銅ボールの直径は $350 \mu\text{m}$ であり，掘り込みの深さは $90 \mu\text{m}$ である．L0 信号伝送の銅ボール接続部分は，疑似同軸線路構造となっている．銅ボール搭載部分には，掘り込み構造を設けて銅ボール搭載実装の歩留まり改善を図っている．上下基板間隔は $175 \mu\text{m}$ であり，厚さ $100 \mu\text{m}$ の GaAs ミキサチップを基板間に挟み込める構造となっている．図 4 は，60 GHz における 3 次元指向性パターンの解析結果である．素子アンテナが 2 点給電のため，それぞれの給電点を単独で利用した場合の解析結果が (a)，(b) であり，(c) は 2 点給電を行った場合の一例である．給電位相差をつけた結果であるが，具体的な数値は省略する．全ての位相差は 45 度きざみで解析を行っており，利得が 10 dBi 以上となる領域を評価した．図 5 は，60 GHz における利得が 10 dBi 以上となる領域の解析結果である．xz 面に主偏波を持つ場合と，yz 面に主偏波を持つ場合，2 点給電を行った場合を重ねて示している．2 点給電を行うことにより， ϕ 方向において 360 度にわたり 10 dBi 以上の利得が得られることがわかった．

測定による評価を行うため，提案アンテナの試作を行った．図 6 は，試作した 60 GHz 帯 2×2 ビームフォーミングアレイアンテナである．基板材料 MEGTRON7 を用いて，多層基板を製作した．その後，上基板のアンテナ基板裏面に GaAs ミキサのフリップチップ実装を行った．最後に銅ボールを用いて上基板と下基板を接続した．IF 信号出力端子コネクタは，必要な箇所のみ実装している．L0 信号の供給には，1.85 mm のエンドランチコネクタを用いた．60 GHz 帯ビームフォーミングアンテナの給電位相差を変化させた場合の 3 次元放射パターンを得るため，エレメントパターンの測定と位相差をつける操作の 2 段階に分けて行った．エレメントパターンの測定には，既に関済済みの測定系を用いた．位相差をつける操作は，MATLAB を用いて計算し，MATLAB 上で 3 次元放射パターンを表示させ，利得が 10 dBi 以上となる領域まで表示させた．図 7 は，利得が 10 dBi 以上となる領域の測定結果である．給電位相差を 45 度おきに 360 度変化させたときの各放射パターンから，利得が 10 dBi 以上となる領域を全て重ね合わせた図である．解析結果と測定結果を比較すると，傾向は一致しており，Theta 方向へのカバレッジエリ

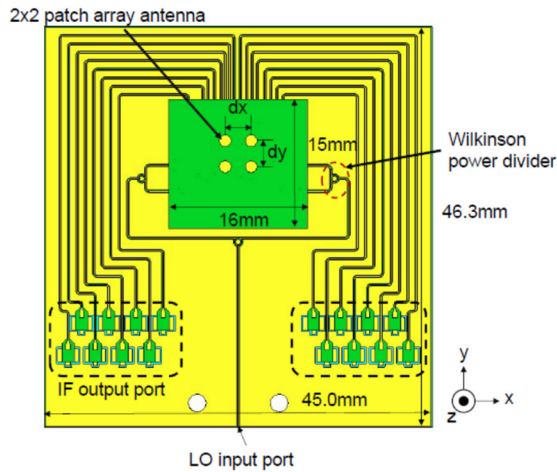


図 3 直交給電パッチアンテナ素子を用いた 60 GHz 帯 2×2 ビームフォーミングアレイアンテナ

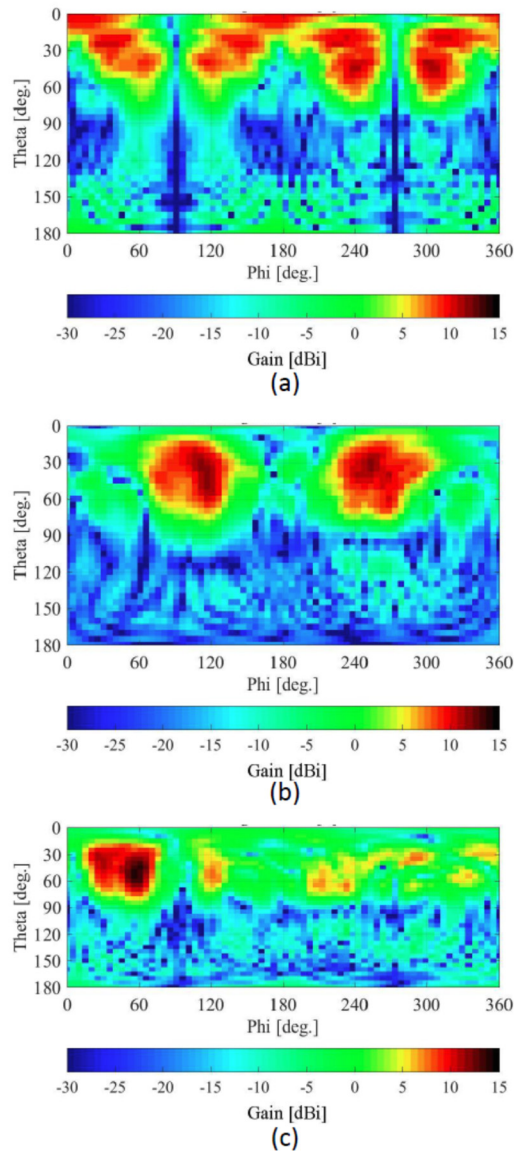


図 4 60 GHz における 3 次元指向性パターン解析結果: (a) xz 面に主偏波を持つ場合, (b) yz 面に主偏波を持つ場合, (c) 2 点給電を行った場合

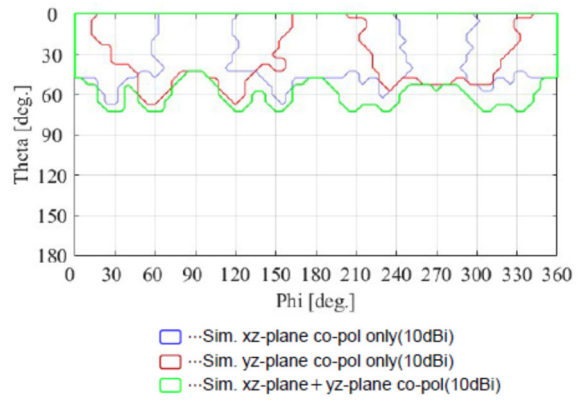


図 5 利得 10 dBi 以上となるエリアの解析結果

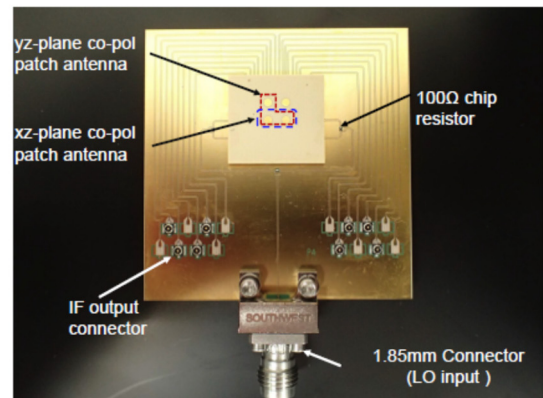


図 6 試作した 60 GHz 帯 2×2 ビームフォーミングアレイアンテナ

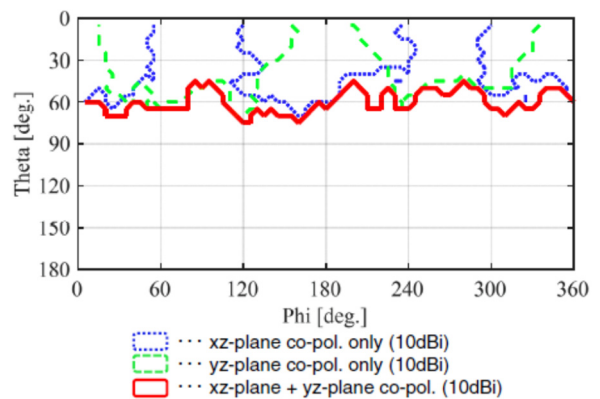


図 7 60 GHz における利得が 10 dBi 以上となるエリアの測定結果

アはおよそ 60 度付近までであり, 解析結果と同様の傾向とを確認した. これらの結果から, パッチ素子を用いた同種サブアレイ間内指向性合成の有効性を, 60 GHz において確認することができた.

謝辞 本研究の一部は, 本科研費以外に, SCAT 研究助成, 小澤・吉川記念エレクトロニクス研究助成, 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究の支援を受けたものです. 放射パターンの測定は, 東北大学電気通信研究所 末松研究室において行われました. 測定作業等でご尽力いただいた多くの方々に感謝申し上げます.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Yoshida and K. Nishikawa	4. 巻 8
2. 論文標題 Experimental verification of excavated structure on multi-layered substrates for millimeter-wave signal vertical transition using copper balls	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 2362-2372
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2019.2961624	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 吉田賢史, 西川健二郎, 川崎繁男	4. 巻 138
2. 論文標題 太陽光発電とマイクロ波電力伝送を併用したハイブリッドエナジーハーベスタの実験評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 615-622
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.138.615	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 R. Onimaru, S. Yoshida, and K. Nishikawa
2. 発表標題 60 GHz dual-polarized 2x2 phased array antenna using copper ball interconnection
3. 学会等名 Global Symp. on Millimeter Waves (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Yoshida, K. Nishikawa, and S. Kawasaki
2. 発表標題 10W class high power C-band rectifier using GaN HEMT
3. 学会等名 Wireless Power Transfer Conf. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Yoshida and K. Nishikawa
2. 発表標題 60-GHz-band dipole array antenna using copper balls interconnection with excavated structure
3. 学会等名 Antennas Design and Measurement Int. Conf. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田賢史, 鬼丸隆太郎, 西川健二郎
2. 発表標題 60GHz帯パッチアレイアンテナを用いた銅ボール接続実装技術および3次元指向性測定技術の検証実験
3. 学会等名 信学技報, MW2019-63
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林雄太, 吉田賢史, 川崎繁男
2. 発表標題 [招待講演] 50kg 級超小型深宇宙探査機「PROCYON」搭載GaN高出力アンプ
3. 学会等名 信学技報, MW2019-61 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鬼丸隆太郎, 吉田賢史, 西川健二郎
2. 発表標題 [特別講演] 4×2パッチアレイアンテナを用いた60GHz帯フェーズドアレイアンテナの3次元指向性測定
3. 学会等名 信学技報, MW2019-124 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田賢史, 小淵大輔, 松浦賢太郎, 西川健二郎, 川崎繁男
2. 発表標題 K帯無線通信とC帯マイクロ波無線電力伝送の両立によるワイヤレスセンサシステムの検討
3. 学会等名 信学総大, C-2-75
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田賢史, 鬼丸隆太郎, 西川健二郎
2. 発表標題 60GHz帯単素子パッチアンテナを用いた銅ボール接続実装技術および3次元指向性測定技術の検証実験
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田賢史, 西川健二郎, 川崎繁男
2. 発表標題 Ka帯シングルシャント整流器の試作評価
3. 学会等名 電子情報通信学会WPT研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Yoshida and K. Nishikawa
2. 発表標題 60-GHz-band array antenna with feeding network using excavated structure for copper ball support
3. 学会等名 3rd Japan-Russia Joint Microwave Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田賢史, 鬼丸隆太郎, 西川健二郎
2. 発表標題 基板掘りこみ構造を適用した60GHz帯2×2平面ダイポールアレイアンテナの試作・評価
3. 学会等名 第71回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鬼丸隆太郎, 吉田賢史, 西川健二郎
2. 発表標題 掘り込み付き基板の基板間接続を用いた60GHz帯パッチアンテナ
3. 学会等名 第71回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田賢史, 鬼丸隆太郎, 西川健二郎
2. 発表標題 多層基板構造を用いた60GHz帯パッチアレイアンテナの設計
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田賢史, 西川健二郎, 川崎繁男
2. 発表標題 HySiC技術とバラクタダイオードを用いたC帯周波数可変整流器の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会MW研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yoshida
2. 発表標題 60-GHz-band vertical interconnection structure with excavated structure for 5G application
3. 学会等名 RIEC Russia-Japan Joint International Microwave Workshop 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉田賢史
2. 発表標題 ミリ波帯通信モジュール用基板間信号伝送線路の研究開発
3. 学会等名 第2回SKA技術開発ワークショップ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鬼丸隆太郎, 吉田賢史, 西川健二郎
2. 発表標題 多層構造を用いた60GHz帯ビームフォーミング用パッチアンテナの検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田賢史, 丸山溪史, 松下大輔, 西川健二郎
2. 発表標題 多層構造を用いたUHF帯および60GHz帯共用アンテナの給電構造に関する基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉田賢史, 佐々木大貴, 西川健二郎
2. 発表標題 基板掘り込み構造を適用した60GHz帯基板間伝送線路
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 吉田賢史, 他多数	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 15
3. 書名 高周波対応部材の開発動向と5G、ミリ波レーダーへの応用～高周波基板、ミリ波吸収材料、アンテナ、回路設計～	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 積層基板及び金属ボールの実装方法	発明者 吉田賢史, 西川健二郎	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-134016	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----